

# Origin, Evolution, and Inventory of Water on Mars

白井寛裕 (宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所)

## 1. 探査によって得られた火星表層環境の描像

火星は地球から最も近い距離にある生命の存在条件を満たした惑星（ハビタブルプラネット）として欧米を中心に数多くの探査研究が行われており、火星に関する我々の知見は近年飛躍的に向上している[e.g., 1]。特に、約 30 億年より古い地質体を中心に多くの流水地形や多種類の含水粘土鉱物が広範囲に渡り相次いで発見され、火星はかつてその表層に液体の水（古海洋）が存在する環境であった可能性が示唆されている（図 1）。例えば、過去の海岸線の高度分布から古海洋の体積変化が推定され、約 40 億年前には全球平均深度 500m 超の古海洋が存在していたことが明らかになっている。また、高空間分解能での観測が可能となった 2000 年代以降の探査では、分光観測に基づく水成変質鉱物の分布が得られるようになった。水成変質鉱物の分布は、火星表層が湿潤な環境から酸化的で乾燥化した環境へと進化していることを示している。2010 年代になると、地球物理データの取得に重きを置いた従来のリモートセンシングに加え、ガンマ線分光計を用いた化学組成データ観測や、着陸機に搭載された質量分析計による同位体組成分析など、地球化学データの取得を目指した探査が行われるようになった。このように、火星探査は、2000 年代の「水およびその痕跡の発見」から 2010 年代の「水環境の理解に基づく火星ハビタブル環境の解明」へと発展してきた。

2020 年代では火星からのサンプルリターン計画（MSR: Mars Sample Return）が本格化し、MSR 用のサンプルキャシュを搭載した大型ローバー（Mars2020）が火星に向けて打ち上げられる予定である。Mars2020 の着陸予定地点（Jezero クレーター）は、粘土鉱物や炭酸塩鉱物を含む河川堆積物で覆われたノアキアン期（約 37-42 億年前）の地質体であり、回収試料の分析により、当時、火星表層に存在した水の状態（氷・水・水蒸気）、化学組成（pH や溶存イオン濃度など）および存在量（水-岩石比）の変遷に関する定量的な情報が得られるはずである[2]。

## 2. 日本の火星探査計画（MMX: Martian Moons eXploration）

2000 年代初頭までほぼ米国により主導されてきた火星探査は、欧州宇宙機関（ESA）によるマーズ・エクスプレスの成功を受け、国際協調の時代に突入し、現在その流れはさらに加速しつつある [3]。一方、日本では、MSR のプレカーサとなる火星衛星からのサンプルリターン計画（MMX: Martian Moons eXploration）が予定されている[4]。MMX では、火星本体ではなく、火星の衛星フォボスからサンプルを回収し、火星衛星の起源の解明を第一目的としている。ただし、火星に近い周回軌道をとるフォボスの表土には数百 ppm 程度、火星からの飛来物質が含まれていると考えられている[5]。火星からランダムにフォボスに供給された火星飛来物質は、広く火星地質年代をカバーし、粘土鉱物を含む多様な火星表層物質を含むと予想される。MMX 回収試料の鉱物学・地球化学分析により、火星表層環境進化に関し、広い時代範囲にわたる連続的な科学データの取得が期待される。また、MMX は MSR よりも早い 2029 年の地球帰還を予定している。火星探査に関し、これまで欧米諸国の後塵を拝してきた日本ではあるが、2020 年代のサンプルリターン時代においては、火星表層環境科学を国際的にリードする可能性を秘めている。

## 参考文献

[1] Ehlmann, B., et al. (2016) *JGR*, **121**, 1927-1961. [2] Beaty, D.W., et al. (2019) *MAPS*, **54**, S3-S152. [3] 白井寛裕・宮本英昭 (2014) *地球化学*, **48**, 221-230. [4] Usui, T., et al. (2018), in *42nd COSPAR Scientific Assembly*. Pasadena, California, USA. Abstract# B4.2-7-18. [5] Hyodo et al. (2019) *Sci. Rep.* **9**, 19833.

# Origin, Evolution, and Inventory of Water on Mars

Tomohiro Usui (ISAS, JAXA)



# Today's Topic on Mars



Evolution of water inventory



Global distribution/diversity of  
aqueous minerals



Evolution of water chemistry &  
surface environment

# Surface Water Inventory of Mars & Earth

Mars is/was a water-rich planet

A small, reddish-brown globe representing early Mars, showing a textured surface with some darker spots.

***Early Mars***

***~0.01-0.1 %***

(Kurokawa+ 2014)

A large, realistic globe of Earth showing continents and oceans. A small blue sphere is placed on the North American continent to represent the amount of surface water.

***Earth***

***~0.02 %***

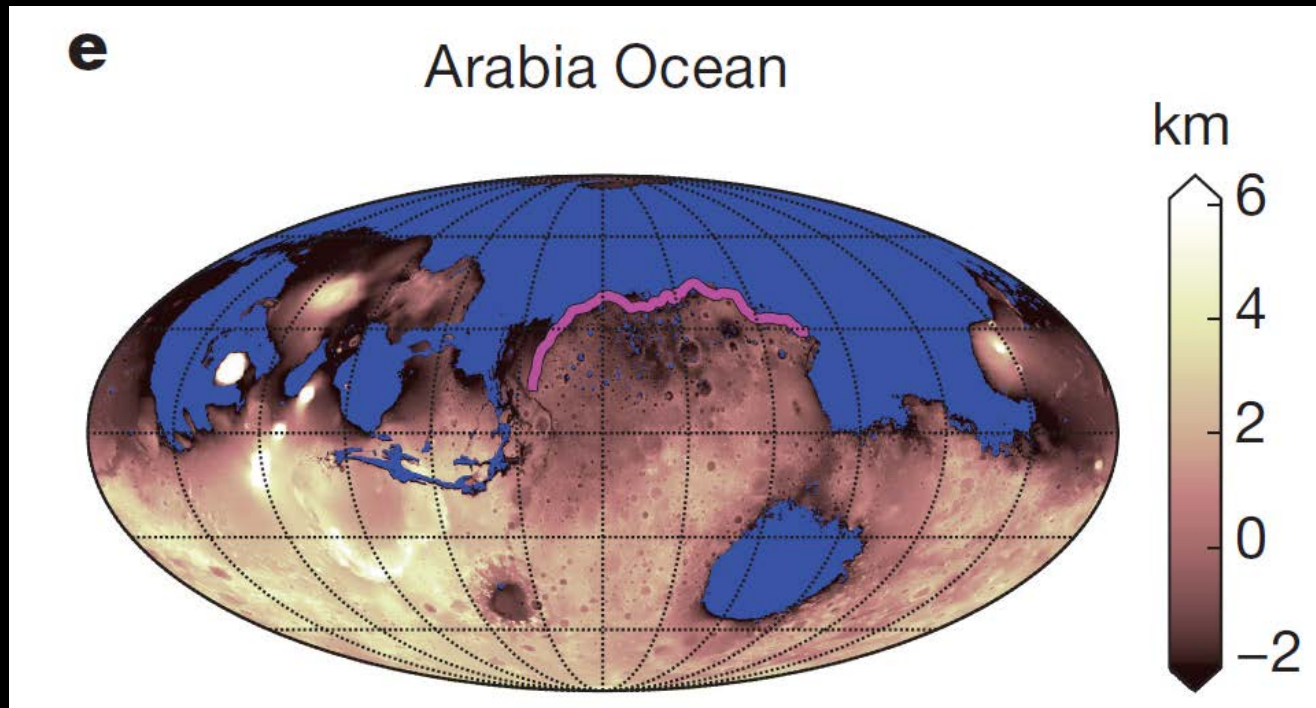
(Genda 2016)



# ESTIMATE OF SURFACE WATER BUDGET

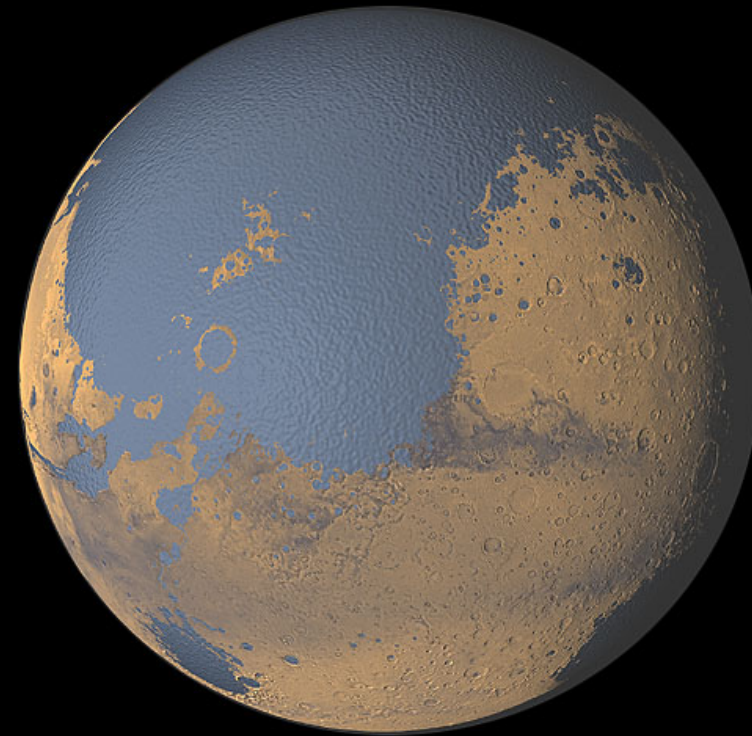
Shoreline demarcation suggests large paleo-oceans at ~4 Ga

Size of paleo-oceans @ ~4 Ga



Head et al. (1999), Citron et al. (2018)

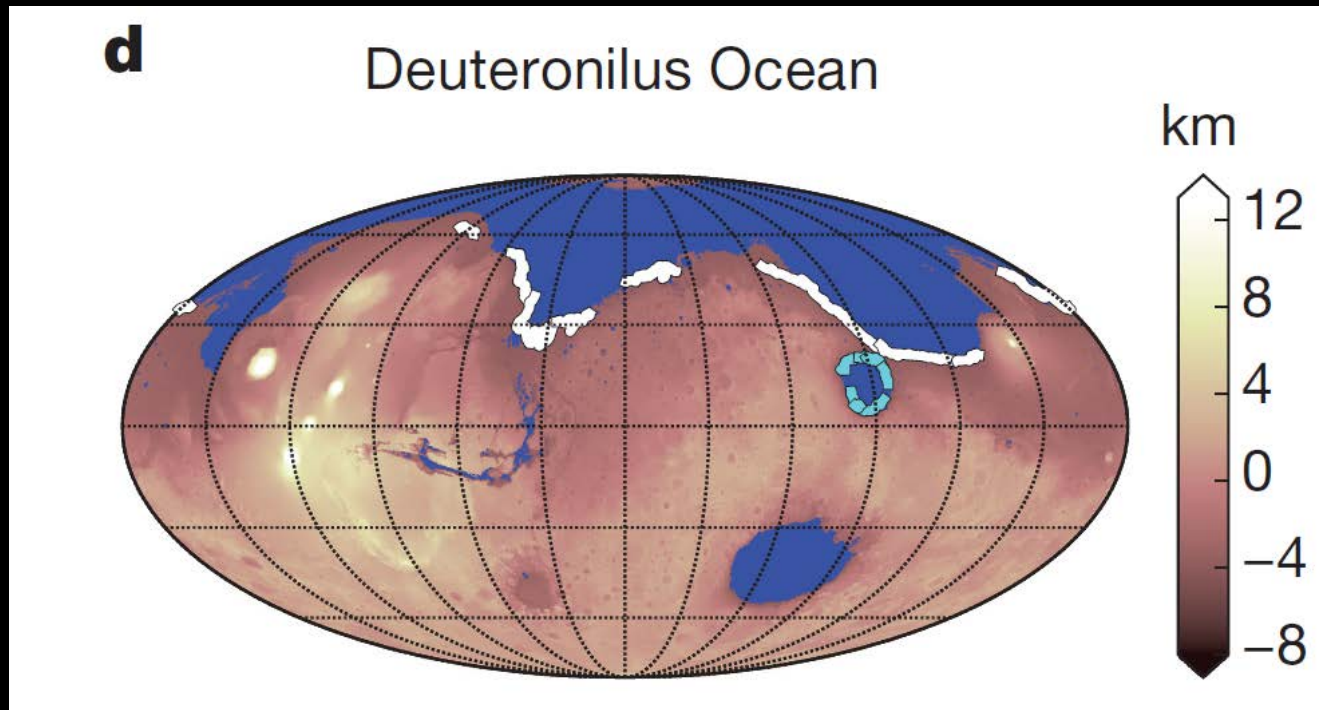
Mars@4 Ga?



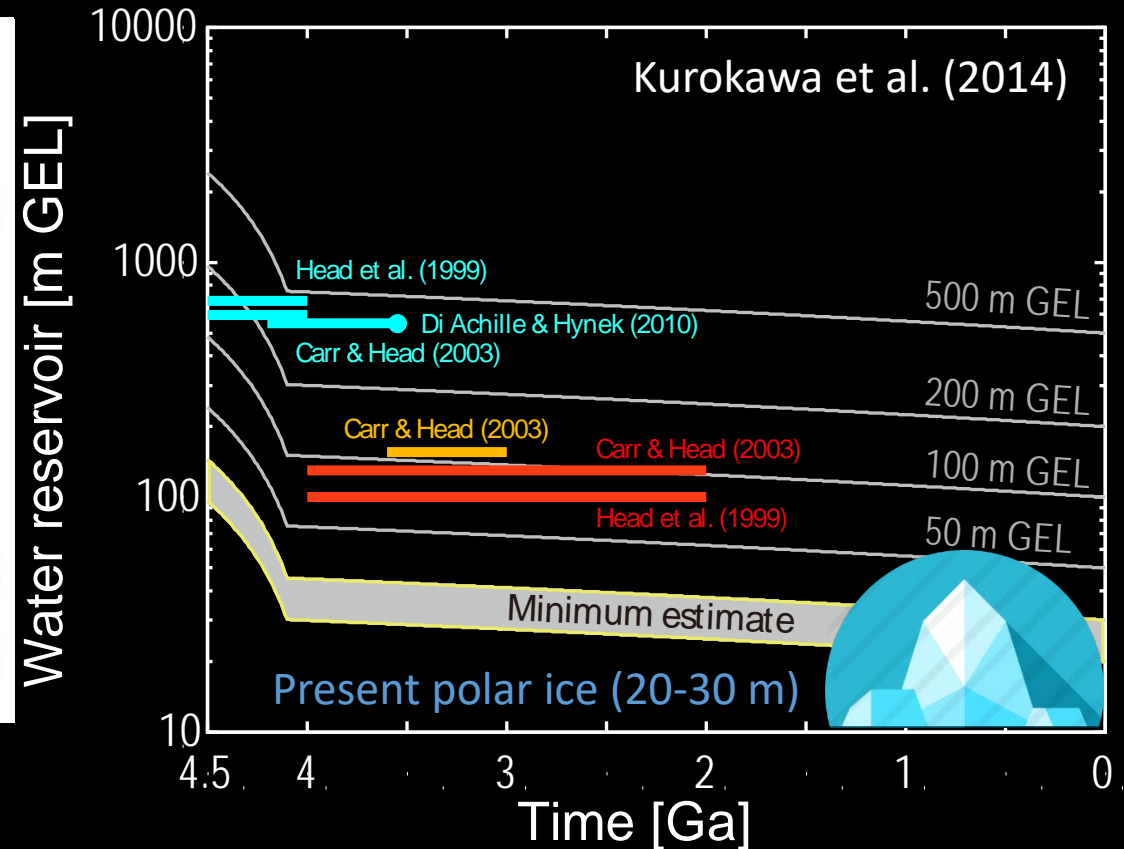
# ESTIMATE OF SURFACE WATER BUDGET

Paleo-oceans decreased with time, but did not escape at all

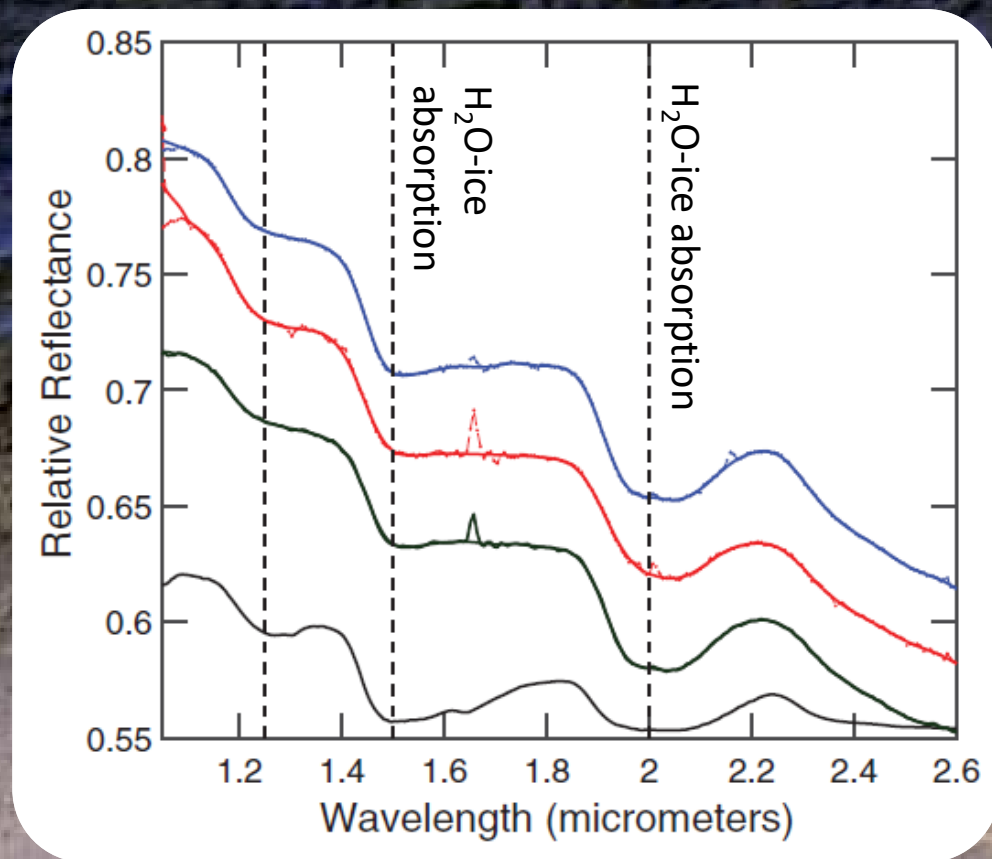
Size of paleo-oceans @ ~4 Ga



Head et al. (1999), Citron et al. (2018)



Exposed subsurface "pure" ice sheets (~10s m thick) observed in the mid-latitudes

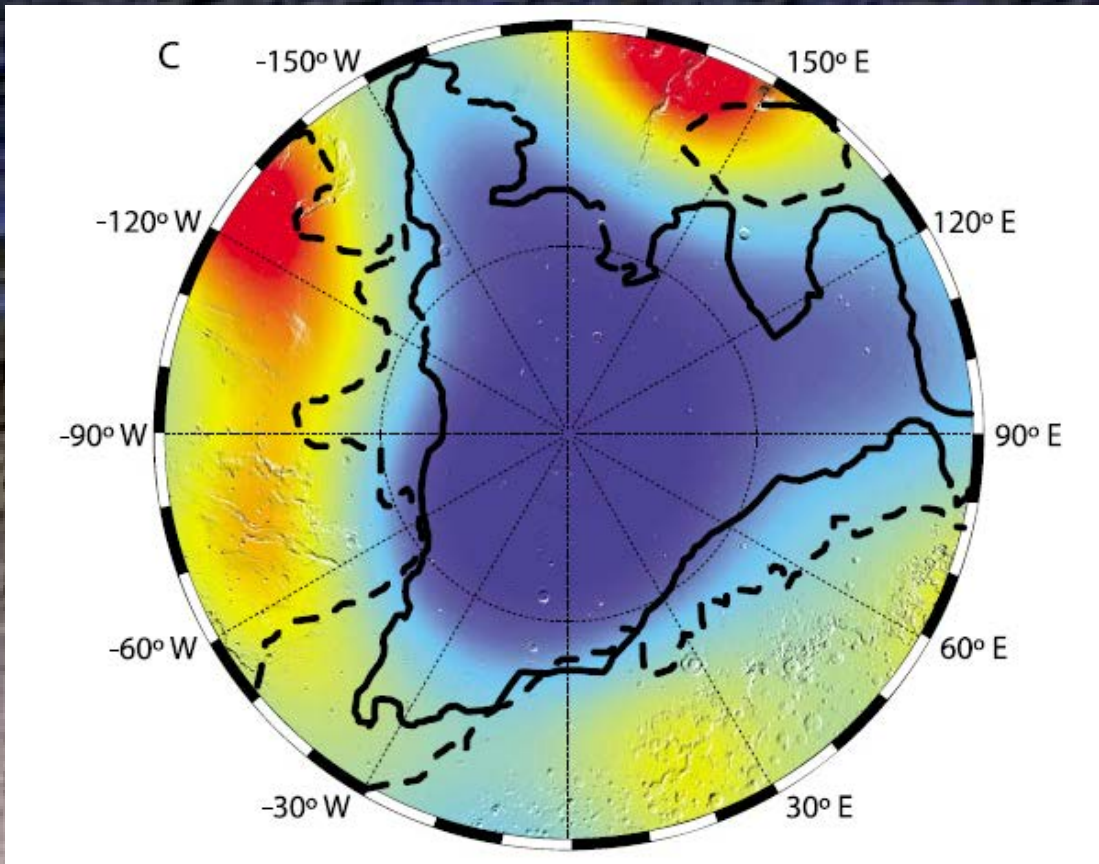


Mars water  
underground



Rader sounder suggest possible existence of ground ice in the northern lowlands

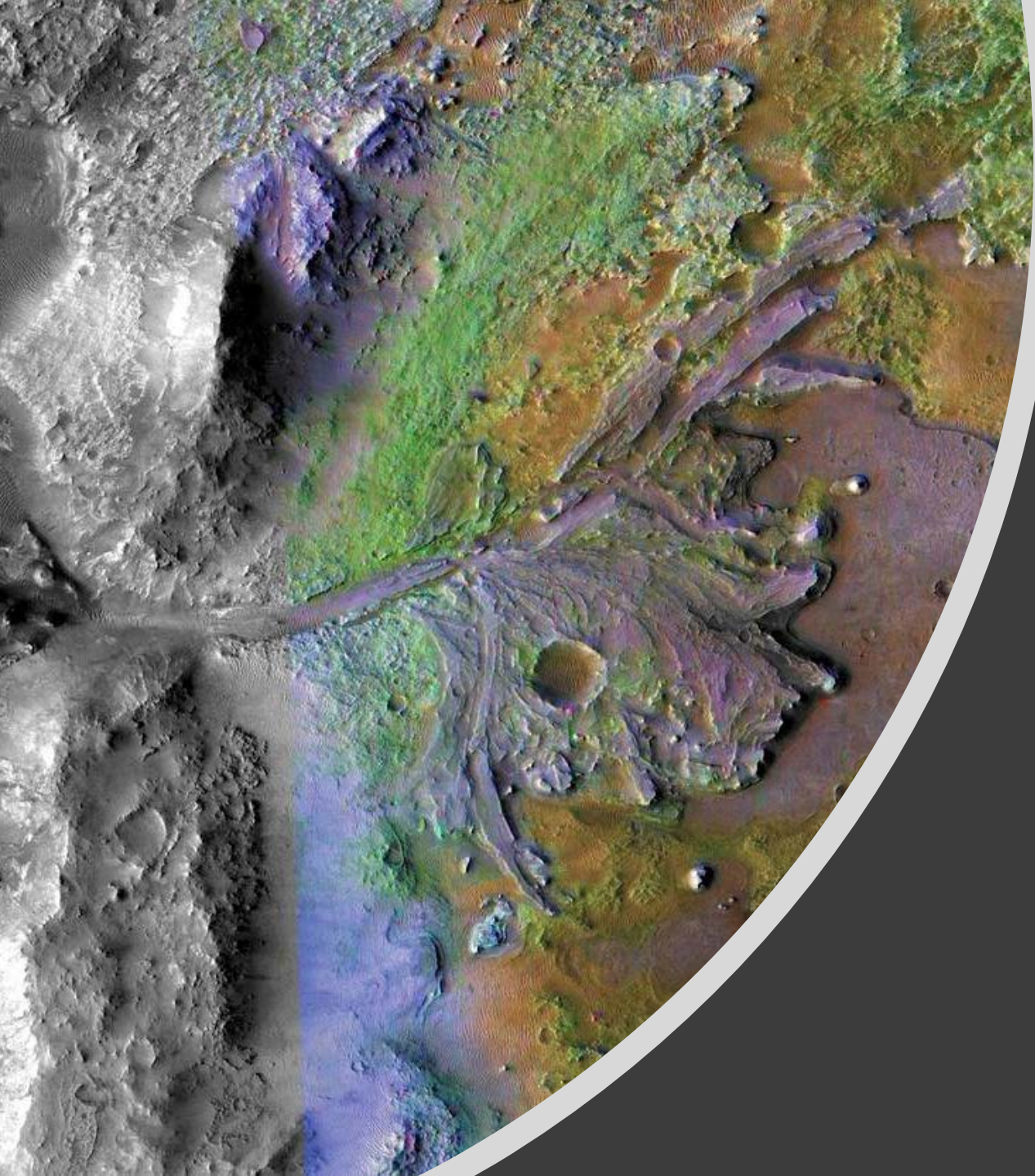
Dielectric map (60-80 m deep) near the N-polar region



Mouginot+ 2012

Mars water  
underground



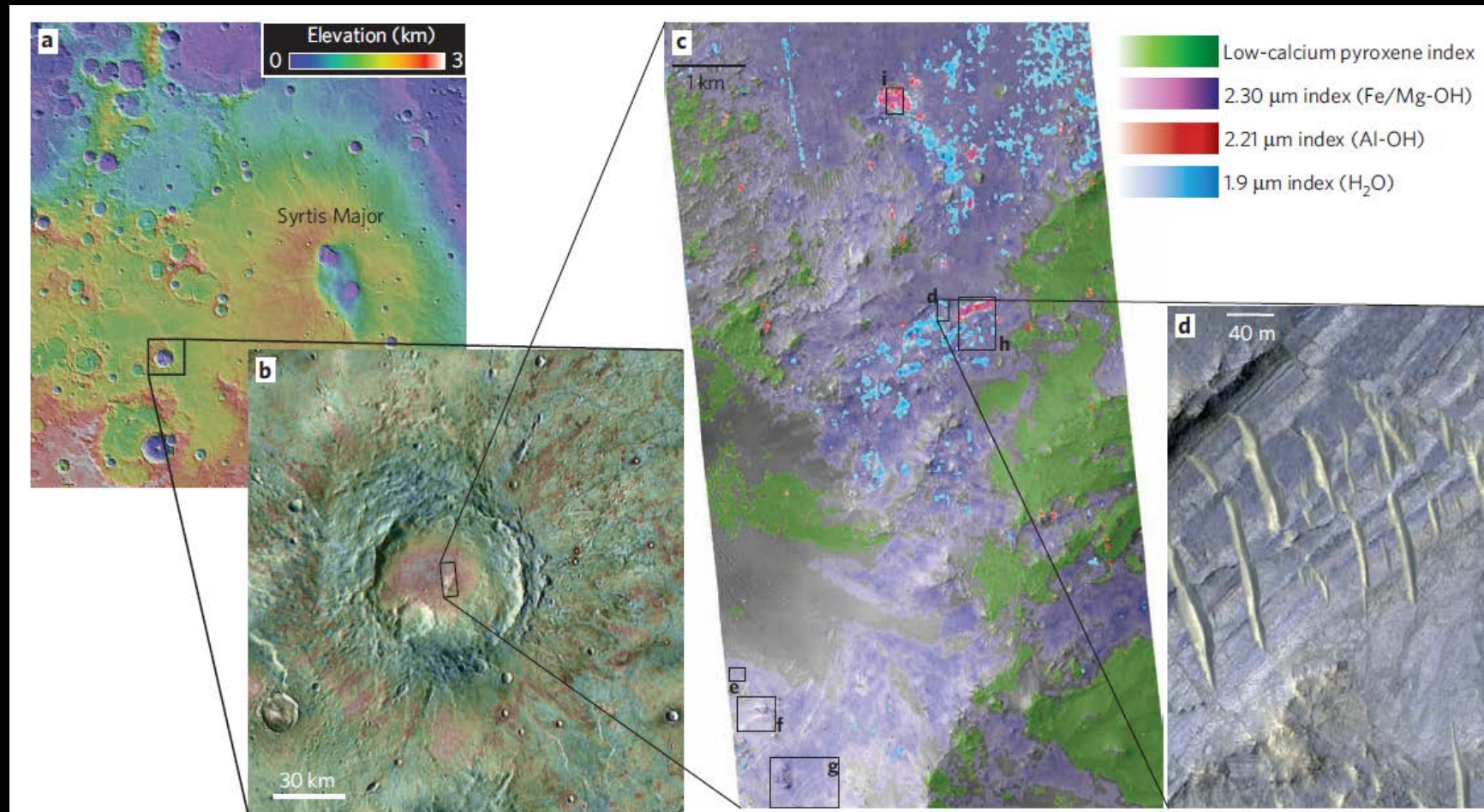


Distribution/diversity  
of aqueous minerals



# Improvement of spatial resolution last decades

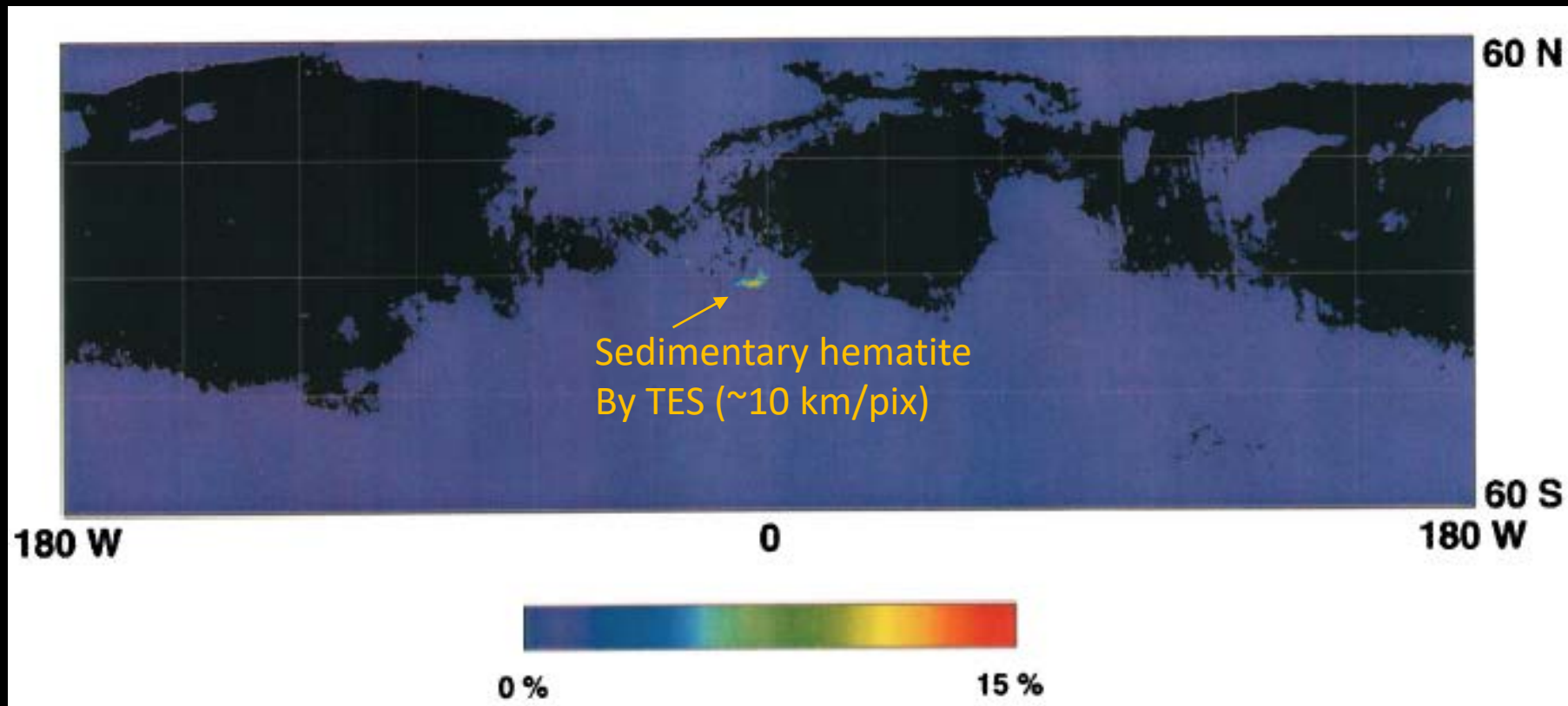
Visible (HiRISE) = 0.3 m/px, IR (CRIMS) = 18 m/pix



# Improvement of spatial resolution last decades

Visible (HiRISE) = 0.3 m/px, IR (CRIMS) = 18 m/pix

2001 2006 2014



Christensen+, 2001



# Improvement of spatial resolution last decades

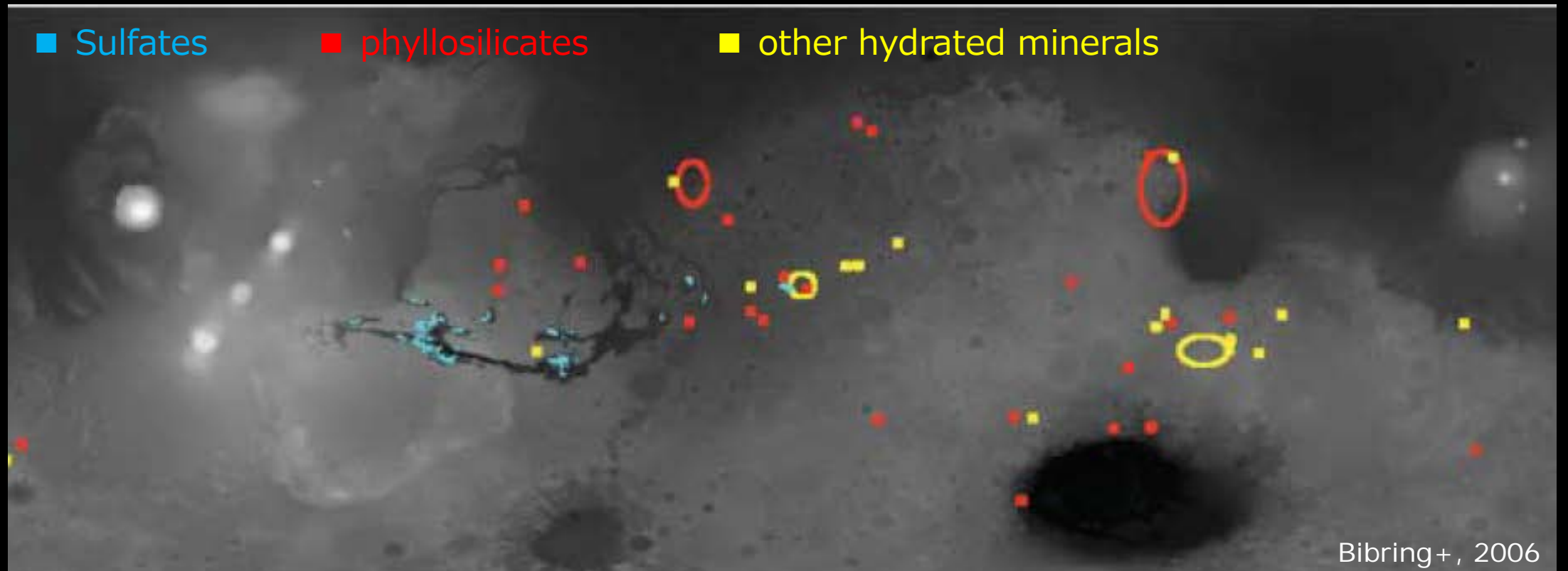
Visible (HiRISE) = 0.3 m/px, IR (CRIMS) = 18 m/pix

2001 2006 2014

■ Sulfates

■ phyllosilicates

■ other hydrated minerals

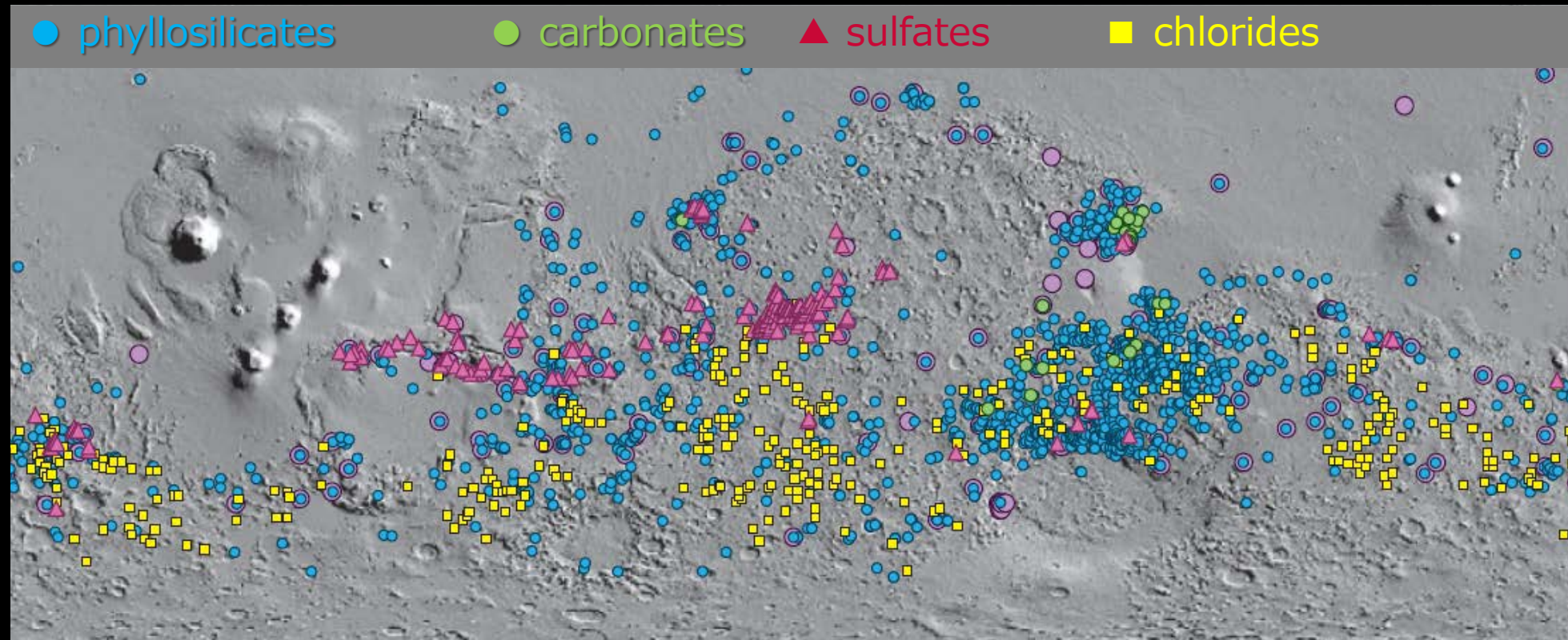


Bibring+, 2006

# Improvement of spatial resolution last decades

Visible (HiRISE) = 0.3 m/px, IR (CRIMS) = 18 m/pix

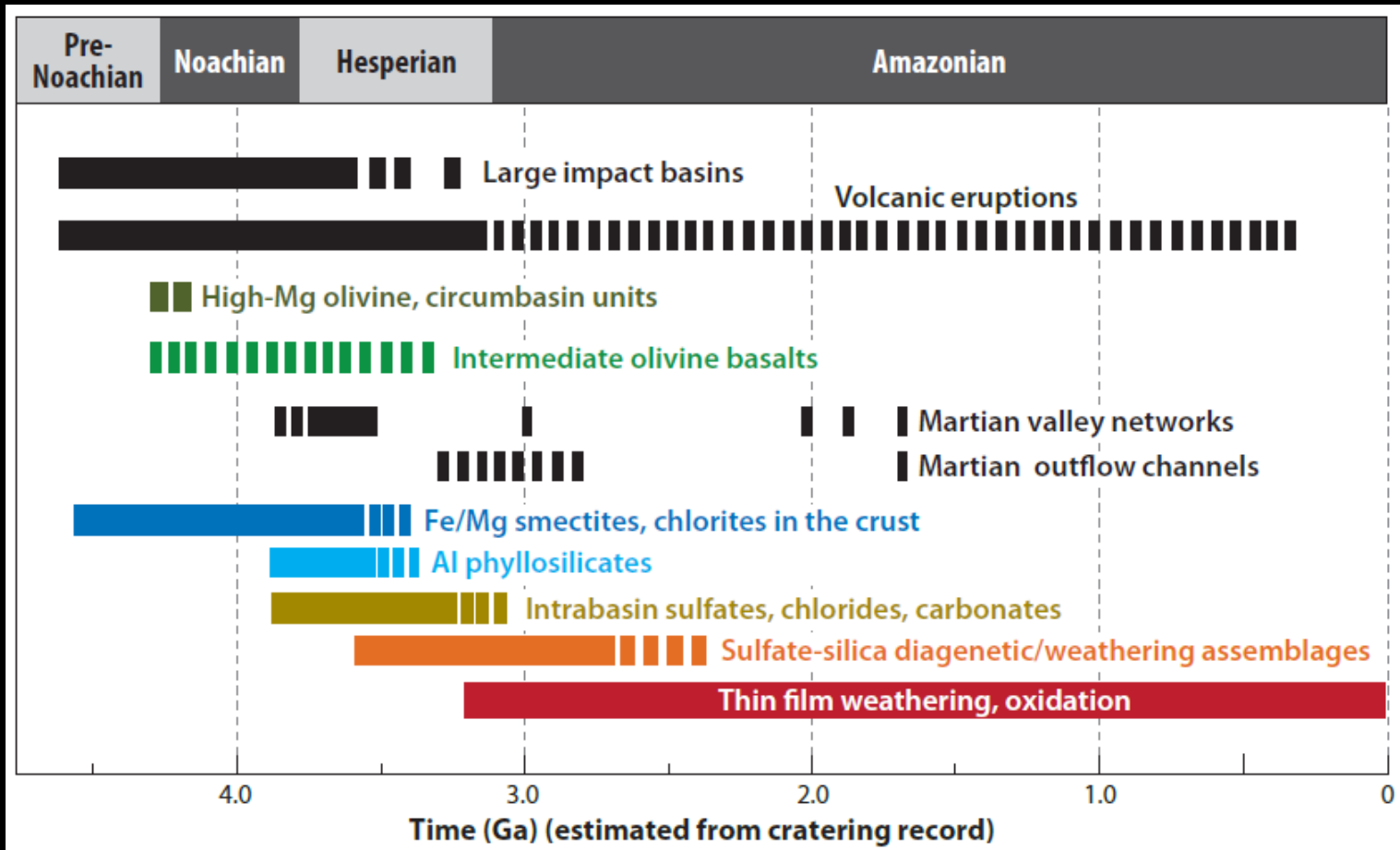
2001 2006 2014



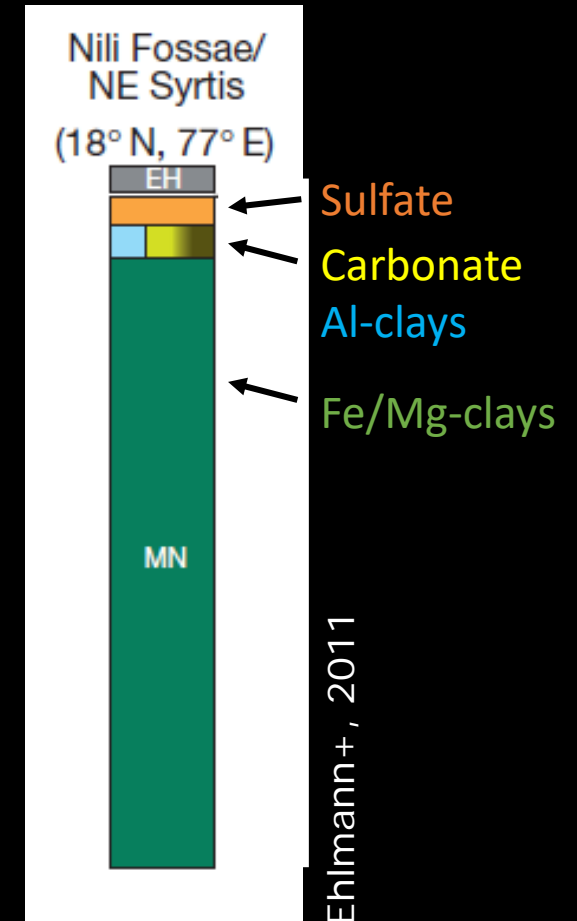
Ehlmann & Edwards, 2014

# Diversity (evolution?) of fluid chemistry

## Alkaline to acidic in Late Noachian to Early Hesperian (~4 Ga)



Ehlmann+, 2014



Ehlmann+, 2011



## Remote sensing

- Panoramic Camera
- Chemical Camera

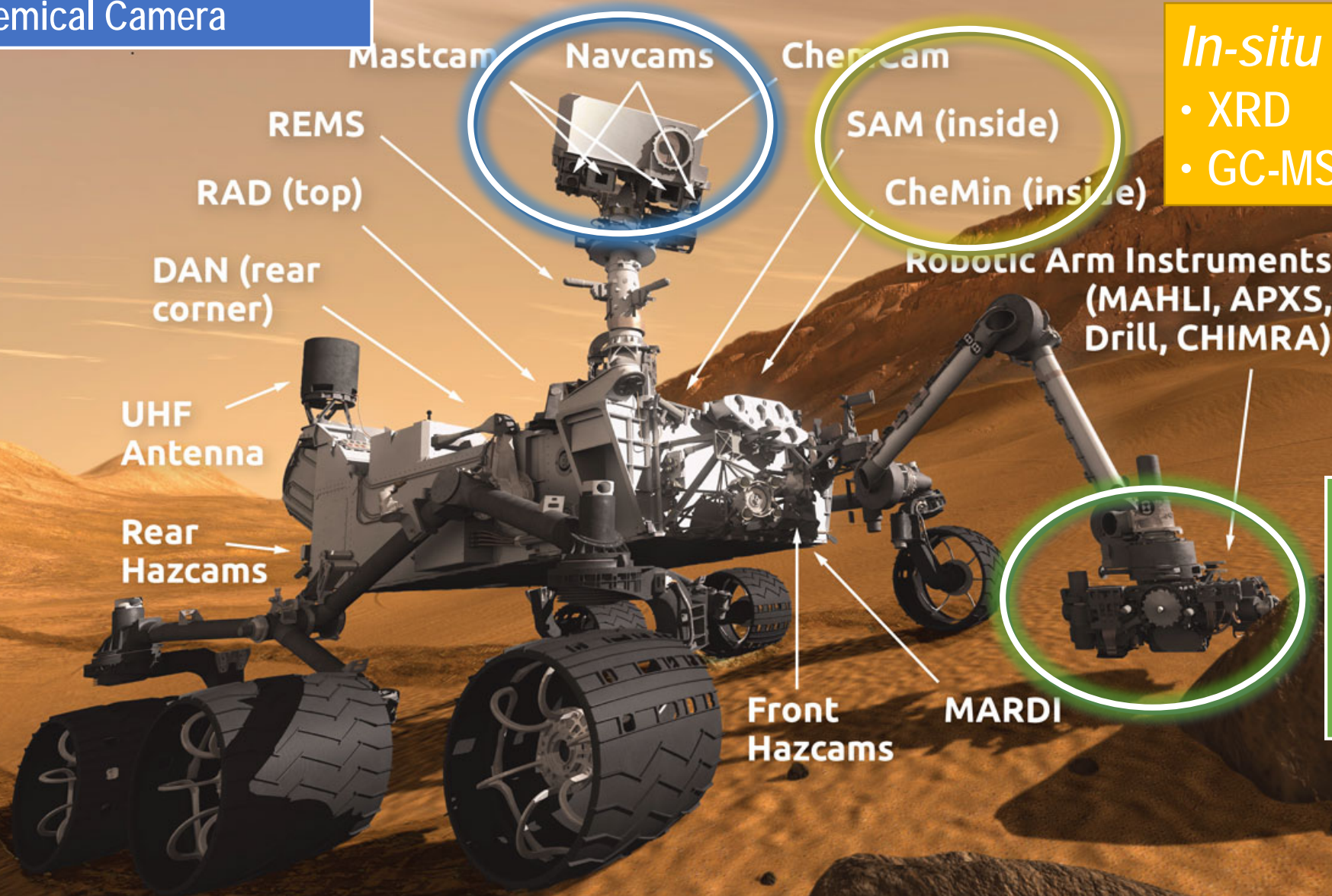
# Curiosity, Geologist on Mars

## In-situ analysis

- XRD
- GC-MS

## In-situ analysis

- Drill
- Microscopic Imager
- X-Ray Spectrometer



Mastcam

Navcams

Chem Cam

REMS

RAD (top)

DAN (rear corner)

UHF Antenna

Rear Hazcams

Front Hazcams

MARDI

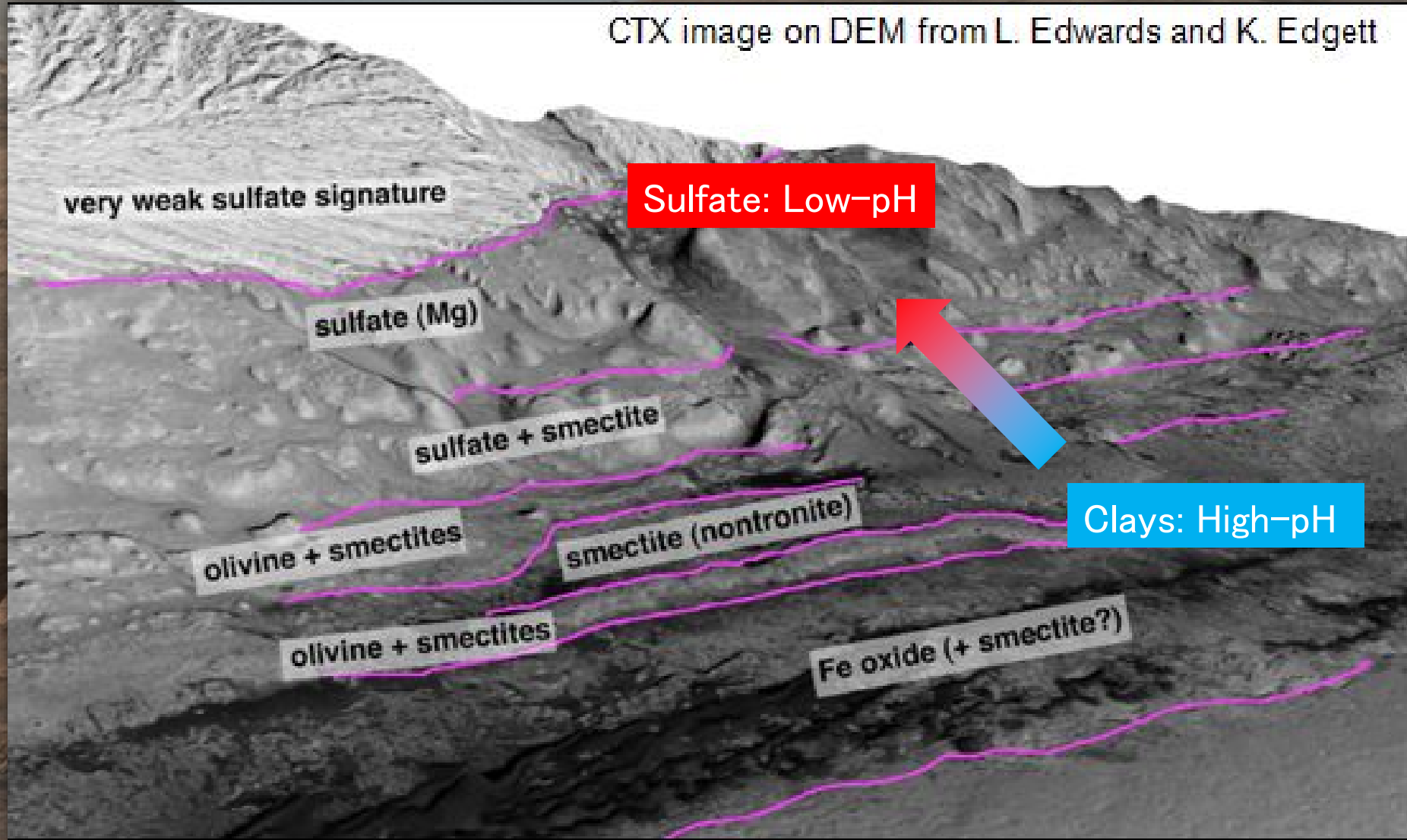
Robotic Arm Instruments (MAHLI, APXS, Drill, CHIMRA)

SAM (inside)

CheMin (inside)



# Evolution of fluid chemistry @Curiosity landing site



# CONCLUSIONS

- Geological and geochemical evidence suggest that Mars was/is a water-rich planet (~comparable to Earth).
- A significant fraction of paleo-ocean water did not lost to space but is currently stored underground as ground-ice and/or hydrous minerals
- High-resolution VIS-NIR remote sensing observations in 2010s (e.g., HiRISE, CRISM) have reported a global/sequential distribution and diversity of aqueous minerals, suggesting the evolution of fluid chemistry from alkaline to acidic in Late Noachian to Early Hesperian.